doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.03.02

Tully-Fisher 关系与重子 Tully-Fisher 关系的研究进展

郭铭谕[1,2]，胡慧杰[1,2]，谷 青[1,2]，杨 航[1,2]，郭 琦[1,2]

(1. 中国科学院 国家天文台，北京100101； 2. 中国科学院大学，北京100049)

摘要： Tully-Fisher 关系和重子 Tully-Fisher 关系 (简称 TFR 和 BTFR) 反映盘星系光度 (重子物质质量) 与气体旋转速度之间的关系。TFR 和 BTFR 不仅是宇宙中重要测距工具，还是检验宇宙学模拟正确性的重要标尺。早期人们用各种波段的光度研究 TFR，其中 I 与 R 波段弥散最小；后来的工作也采用星系恒星质量与旋转速度的关系。相比于 TFR，BTFR 具有弥散更小、适用范围更广的优点。星系旋转速度研究上，干涉阵望远镜相对于单天线的主要优势包括能得到更高的空间分辨率和速度场，再借助倾斜环模型能将中性氢运动特征参数化；而像 FAST 这样的大口径单天线望远镜，由于灵敏度高，在探测超弥散星系 (UDG) 等暗弱源候选体方面有优势。除综述研究进展以外，还初步研究了大质量星系 BTFR 受气体含量的影响。

关 键 词： Tully-Fisher 关系；旋涡星系；中性氢

中图分类号： P157 **文献标识码：** A

1 引 言

在星系形成和演化的研究中，星系的质量 (恒星质量或重子物质质量) 和气体旋转速度都是基本的物理量，它们之间的关系由 Tully-Fisher 关系 (Tully-Fisher relation, TFR) 和重子 Tully-Fisher 关系 (baryonic Tully-Fisher relation, BTFR) 给出。Tully-Fisher 关系是星系的光度 (恒星质量) 与旋转速度 (rotation velocity) 之间的经验关系，在恒星质量-旋转速度双对数坐标系下，星系样本点近于直线分布，且直线的斜率为 $3 \sim 4$[1]。重子 Tully-Fisher 关系则是星系的重子物质质量与旋转速度 (或发射线宽) 之间的经验关系；同样，双对数坐标系下接近直线分布，且星系样本点的弥散 (尤其在小质量端) 相比于传统的 Tully-Fisher 关

收稿日期： 2022-09-30； **修回日期：** 2022-10-24

资助项目： 国家自然科学基金 (11988101)；国家重点研发计划 (2018YFA0404503)；中国载人航天项目科学研究基金 (CMS-CSST 2021-A03, CMS-CSST 2021-A07)；王宽诚教育基金

通讯作者： 郭铭谕，guomingyu20@mails.ucas.ac.cn

系更小。无论是 Tully-Fisher 关系还是重子 Tully-Fisher 关系，都是行之有效的测距工具，是“宇宙距离阶梯”的重要一环。此外，它们还能用于限制和检验星系宇宙学模型。

Tully-Fisher 关系可以在所有星系有相同的质量轮廓和旋转曲线，所有星系有相同的中心面亮度，以及所有星系有相同的平均质光比 M/L 这三个条件下，用基本物理规律推导而得[2]。气体在引力作用下作圆周运动，有

$$M \approx r_d v^2 \ , \tag{1}$$

面亮度表达式为：

$$I(r) = I_0 \mathrm{e}^{-r/r_d} \ , \tag{2}$$

总光度表达式为

$$L = \int_0^{+\infty} 2\pi r I(r) \mathrm{d}r \ , \tag{3}$$

由上两式得到：

$$L = 2\pi I_0 {r_d}^2 \ , \tag{4}$$

式 (1) 的平方与式 (4) 相除，得到：

$$\frac{M^2}{L^2} L \approx \frac{v^4}{2\pi I_0} \ . \tag{5}$$

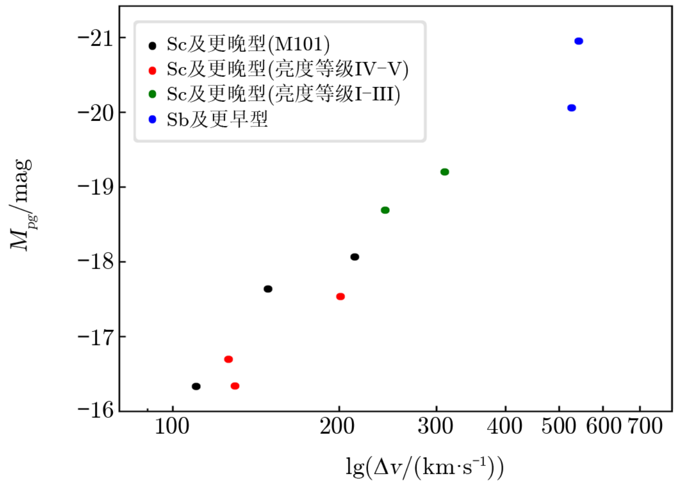
由前提条件“所有星系有相同的平均质光比”可知式 (5) 左侧 $\frac{M^2}{L^2}$ 为常数，即得

$$L \approx v^4 \ . \tag{6}$$

但是星系的质光比、中心面亮度以及密度轮廓显然具有多样性，因此这仅作为对 Tully-Fisher 关系的理解的简单推导。

Tully-Fisher 关系最早由 Tully 和 Fisher 在 1977 年提出 (见图 1)，他们从当时已有可靠观测数据的盘星系样本 (包括本星系群 (local group)、M81、M101 等) 中发现星系 HI 谱线宽度与绝对星等 (B 波段测光) 有很好的幂律关系。HI 谱线宽度是星系旋转速度的反映，与距离无关。而星系的视星等很容易测量，视星等一定时，绝对星等就是距离的单一变量函数。因此，Tully-Fisher 关系成为河外盘星系的测距工具，并且 Tully 和 Fisher 尝试用该关系计算 Virgo 星系团、Ursa Major 星系团的距离[3]。不久，人们发现近红外测光比光学测光更有优势。1980 年，Mould 等人[4]对 M81、M101 等采用 H 波段 (1.65 μm) 测光。1983 年 Aaronson 和 Mould[5]发现，与 B 波段 (蓝光) 测光相比，红外测光得出的 TFR 不依赖于星系形态特征，且星系样本点弥散更小，说明红外测光所得的 TFR 是更好的测距工具。1984 年 Sandage 和 Tammann[6]发现，在孤立环境和星系团中 TFR 的斜率是不一样的，说明 TFR 是受环境影响的。

随着电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 的发展，TFR 的研究在 1985−2000 年进展快速。Willick[7]和 Courteau[8]分别用 21 cm-线宽和光学旋转曲线确定星系旋转速度，



注：图中横轴为旋转速度。样本点包括不同类别近邻盘星系，大致呈直线分布。

图 1 Tully **和** Fisher **的** Tully-Fisher **关系**[3]

同时 Han[9]在 1991 年对 Aaronson 20 世纪 80 年代初做过 H 波段测光的星系样本进行 I 波段 TFR 巡天。1995 年，Hendry 等人[10]测量了南天部分星系团中 星系的 Tully-Fisher 距离。1997 年，Haynes 等人[11]对团簇星系进行大规模 I 波段巡天，最远的样本线芯速度达到约 1×10^4 km · s^{-1}。1999 年 Dale 等人[12] 分别利用 R、I 波段巡天研究星系旋转速度，最终计算出线芯速度为 2.5×10^4 km · s^{-1}。

2003 年，Courteau 等人利用积分场光谱 (integral field spectroscopy, IFS) 和 V、I 波段 CCD 图像的数据探究星系棒对 TFR 的影响，结果发现不仅星系结构和动力学参数基本不受棒存在与否影响，而且星系样本点在 TFR 上的分布与棒的存在无关[13]。2006 年 Bedregal 等人[14]构建了当时最大的 S0 星系样本，研究发现无论用光学还是红外的数据，得出的 TFR (绝对星等-最大旋转速度) 拟合线整体在近邻盘星系 TFR 拟合线下方，且样本点弥散更大。

随着观测技术和望远镜探测能力的提高，越来越多小质量、富含气体的星系被观测到，这些小质量星系样本在 TFR 上基本分布于大质量星系 TFR 拟合线下方，这种偏离在旋转速度小于 90 km · s^{-1} 的孤立星系中表现更明显。

2000 年，McGaugh 等人[15]提出，重子物质质量是比光度更基本的物理量，提出了重子 Tully-Fisher 关系，BTFR 的纵轴用星系的重子质量 (恒星质量与气体质量的总和) 代替了 TFR 的星等或恒星质量，他们发现 BTFR 的线性关系相比于 TFR 更为紧致，并且 BTFR 的线性关系在五个量级的重子物质质量范围都保持得很好[16, 17]。

重子 Tully-Fisher 关系相比于传统的 Tully-Fisher 关系不仅有很多优点，而且是宇宙中更基本的标度关系 (scaling relation)。Verheijen 和 Sancisi[18]在 2001 年首次讨论了高空间分辨率的 HI 旋转曲线对于 BTFR 研究的重要性，他们指出：在最大可测量半径处，旋转曲线仍处于上升段的星系整体分布在低速一侧；而对于已经达到水平段的星系，若用最大

速度作旋转速度，则这些星系都分布在高速一侧。当用水平段速度代替最大速度作旋转速度 (此后 McQuinn 等人[19]指出，对于测不到水平段速度的星系，用拟合 HI 旋转曲线的办法)，这种整体偏移就消失了。2007 年，Noordermeer 等人[20]通过研究大质量星系样本，进一步确认了 BTFR 的基础性地位，并论述 ΛCDM 下 BTFR 反映了星系中重子物质与暗物质晕的联系，不过他们也发现，非常大质量星系样本数量少会导致结果偏差 (非常大质量星系样本点偏离中等质量星系样本的拟合线)，2012 年 Desmond[21]得到了同样的结论。同在 2012 年，McGaugh 发现用水平速度作横轴的 BTFR 拟合线斜率 3.94，高于基本标准宇宙学模型 (ΛCDM) 的预测值，这是他们提出修改牛顿动力学 (Modified Newtonian Dynamics, MOND) 的原因之一[16]。Lelli 等人[22] 在 2019 年研究 153 个 SPARC 低红移星系样本时发现，由旋转曲线水平段的平均速度得出的 BTFR 最为紧致，他们认为 BTFR 可以作为盘星系的“基本面” (fundamental plane)，并且之前 2016 年 Lelli 等人[17] 发现 BTFR 不仅适用于旋涡星系，对一些不规则星系 (irregulars) 同样适合。

虽然 BTFR 有广泛性，但 Mancera 等人[23]发现了超弥散星系 (ultra diffuse galaxies, UDG) 是唯一偏离BTFR的例子。最近，许多工作已经开始关注更高红移星系的BTFR。Topal 等人[24]在 2018 年用 CO 研究红移 0.05~0.3 的 BTFR，发现没有演化特征；Übler 等人[25]和 Tiley 等人[26]用光学 Hα 发射线研究红移约为 1 的 BTFR 甚至得到矛盾的结果。相较 CO 和光学波段，HI 测量的旋转曲线一般被认为更加接近暗物质晕的旋转曲线，因为 HI 的分布相较于恒星的分布更广；另外，用不同方法处理不同红移处的星系样本，也不适合相互比较。因此，只有在未来干涉阵射电望远镜进一步发展的时候，我们能得到更高红移星系高空间分辨率的速度场信息，才能更好地研究 BTFR 的演化[27]。

本文第 2 章介绍 TFR 和 BTFR 的特点和各种应用；第 3 章中，我们利用 Arecibo 望远镜的 ALFALFA 100 中性氢巡天光谱数据，探究大质量星系 BTFR 的气体比例依赖性；第 4 章是总结与展望。

2 TFR 和 BTFR

2.1 各种形式 Tully-Fisher 关系的测距准确性

Tully-Fisher 关系 (TFR) 从 1977 年被提出开始，就对旋涡星系的研究产生了重要的影响，最基本的就是作为遥远星系的测距工具，是宇宙距离阶梯 (cosmic distance ladder) 的一环。

最开始 Tully 和 Fisher 用绝对星等 (B 波段测光) 作 TFR 的纵轴，并以这种 Tully-Fisher 关系拟合线估测 Virgo 和 Ursa Major 星系团的距离。这有很大的缺点，因为 B 波段只能探测到年轻的恒星。对于年老的大星系而言，恒星颜色整体偏红，红色到近红外波段测光才能探测到它们的大部分。因此，TFR 纵轴很快就被 IR 光度取代 (当时称“IR/HI 关系”)。不同波段的比较：1980 年代以后，随着 CCD 技术不断发展，光学、红外各波段都被用于 TFR 研究，通过比较[28]可以发现，R 和 I 波段 CCD 测光得到的 TFR 比其他波段弥散更

小，是更准确的测距工具。

后来，TFR 的纵轴——绝对星等逐渐被星系中的恒星质量取代。星系中的恒星质量是比光度更基本的物理量，因为恒星质量不仅综合考虑了各个波段星光，且不像光度那样取决于星系的恒星年龄分布以及金属丰度分布。这里介绍两类常见的得到星系中恒星质量的办法。

第一类是宽波段测光方法即 SED 方法。

(1) Bell 方法[3]。首先对于每一个星系都要建立 2 个网格：一个在星系的真实红移处，一个在红移 0 处。二维网格的第一维度是用 PEGASE 模型产生出的一系列金属丰度；另一维度是一系列不同的恒星形成历史，一般用带参数 (一系列梯度变化的参数) 的恒星形成率函数 (star formation rate, SFR) 表征，例如 $\psi=[\tau^{-1}(1-\mathrm{e}^{-T_0/\tau})^{-1}]\mathrm{e}^{-t/\tau}$，其中 τ 取一系列不同的值。网格应相对均匀地填充颜色空间。把观测到星系与网格中不同颜色的星系模型做对比，在最小二乘法意义下取与真实观测星系最相近的模型作为星系模板。然后进行 k 改正、演化改正，其中，作演化改正时假定星系的颜色随演化过程稳定连续改变。最后，估计恒星质量：根据星系的初始质量函数 (initial mass function, IMF) 及星族合成模型，可以推出恒星总质量、光度信息。

(2) 更新的 SED 拟合方法。SED 全称 spectral energy distribution，即光谱能量分布，是流量 (强度) 随着波长变化的关系。包括 Salim 等人[29]，Ponomareva 等人[30]都是使用 SED 拟合得到星系的恒星质量。SED 方法与 Bell 方法的共同之处是都要与模版库对比，但 SED 方法至少考虑到更多的波段和消光效应。在取得光学观测数据的情况下，一般用最大似然估计法 (maximum likelihood method) 来决定何种模板与观测数据匹配得最好。具体做法是：对于每一个模板 SED，计算

$$\chi^2=\sum_n\left(\frac{F_{\mathrm{galaxy},n}-sF_{\mathrm{template},n}}{\sigma_n}\right)^2\ , \tag{7}$$

其中，$F_{\mathrm{galaxy},n}$ 和 $F_{\mathrm{template},n}$ 分别是观测星系和模板的流量，s 是归一化参数，σ_n 是观测星系第 n 个波段的流量 1σ 误差值。使对每一个模板 SED，χ^2 都取得最小值，s 的计算采用如下公式：

$$s=\frac{\sum_m\left(\frac{F_{\mathrm{galaxy},m}F_{\mathrm{template},m}}{{\sigma_m}^2}\right)}{\sum_m\left(\frac{F_{\mathrm{template},m}}{\sigma_m}\right)^2}\ . \tag{8}$$

计算出 s 和 χ^2 就相当于选择了一种似然分布的模式。恒星质量近似于最佳拟合模板的恒星质量乘以 s。这里再以 CIGALE 软件包[31, 32]为例——通过输入 u、g、r、i、z 等多波段流量 (如果是星等，可用其附带程序转换成 mJy 为单位的流量值) 及红移，可以产生每个星系的光谱能量分布，并在生成这种分布的过程中，通过最佳拟合找到星系中恒星质量的估计值。CIGALE 的原理简单，基本准则就是能量守恒，即紫外 (UV)-近红外被尘埃吸收的能量等于中红外-远红外再发射的能量。CIGALE 考虑的波段非常广，尤其是新版 CIGALE 加入了 X 射线——目前在拟合中已经考虑 X 射线到射电各个波段，并且运行时各波段的模型是并

行运行的模块，恒星形成历史、恒星质量、电离气体、尘埃消光、再发射、活动星系核等可同时完成计算。这种方法的优点不仅快速，而且能够修正 Bell 方法中因为缺乏考虑消光而导致 TFR (包括 BTFR) 样本点弥散偏大的问题。

第二类方法是光谱测光方法，例如 Kauffmann 等人[33]和 Gallazzi 等人[34]。这种方法基于 D4000, Hβ, $H\delta_A+H\gamma_A$, [Mg_2, Fe] 等多种谱线的模型。首先根据所观测星系的 z 波段光度估算尘埃消光改正，可以通过比较星系经发射线改正的 $(r-i)$ 颜色和无尘埃消光而有红移的模型所得之 $(r-i)$ 颜色来得出消光指数 A_z；对于给出 $(r-i)$ 颜色红于观测到星系颜色的模型，予以排除，以避免消光指数为无物理意义的负数，只留下有物理意义 (有用) 的模型；接下来在考虑消光的情况下计算有用模型的质光比 M_*/L_z；然后对于任何一种有用模型，恒星质量等于模型所得质光比与经过尘埃消光改正星系光度的乘积；最后求取恒星质量最佳估计，可以采用对各个有用模型结果加权求和的方式，其中 Kauffmann 等人[33]用的是贝叶斯似然估计法。

1977 年以来测光 TFR 主要工作及其误差列于表 1。

表 1　1977 年以来测光 TFR 主要工作比较

波段	误差/mag	年份	参考文献
B	0.5～0.6	1977	[3]
近红外	0.45	1983	[5]
I	0.20～0.25	1987	[35]
R 和 I	0.25	1988	[36]
R	0.30	1990, 1991	[7]
R	0.32	1992	[8]
I	0.10	1994	[37]
I	0.42	1994	[38]
I、H	0.35～0.40 (I), 0.45 (H)	1995	[39]
I、R 和 H	0.4	1996	[40]
R	0.34	2000	[41]
B、Ks	0.88 (B), 0.98 (Ks)	2006	[14]
g、r、i 和 z	0.4	2007	[42]
g、r 和 i	0.32	2018	[43]

2.2　BTFR

作为重子质量与气体旋转速度重要标度关系的 BTFR，在具体的宇宙学模型下有着相应的物理意义。

ΛCDM 宇宙学模型中，星系旋转曲线 (Hernquist 模型) 在大半径处收敛于非零值，这是因为旋转速度表征星系的总质量 (重子物质+暗物质)，BTFR 反映了重子质量与动力学质量的关系，或者说是重子物质质量与总质量的关系。相比 TFR，BTFR 有以下两大优势。

(1) BTFR 样本弥散小

Famaey 和 McGaugh[44]观测得到 BTFR 的弥散为 0.24 dex，之后 McGaugh 用同样的

Dutton 模型估计出其中本征弥散小于 0.15 dex；Lelli 等人[17]得到 BTFR 本征弥散约为 0.11 dex。在许多 BTFR 研究中，天文学家都得到了比使用恒星质量的 TFR 更小的弥散，且大部分弥散来自于测量不准确性，本征弥散非常小。

由于得到 BTFR 需要重子物质质量 $M_{\rm b}$ 与旋转速度 V 的信息，BTFR 的本征弥散可以来自两个方面。一是 $M_{\rm b}$-M_{200} 关系存在弥散，这是有重子过程和星系环境因素引起的；二是 V-$M_{\rm halo}$ (气体旋转速度-暗物质晕质量关系，例如 $V_{\rm b}$-$M_{\rm halo}$) 关系的弥散，原因如下——对于暗物质晕质量相同的星系，物质的聚集度是不一样的。越早形成的星系聚集度越大，且重子物质的分布与反馈也会影响聚集度。这就导致质量-聚集度关系的弥散，而暗物质晕的质量通过旋转曲线与旋转速度相联系，V-$M_{\rm halo}$ 关系的弥散就这样产生了[45]。

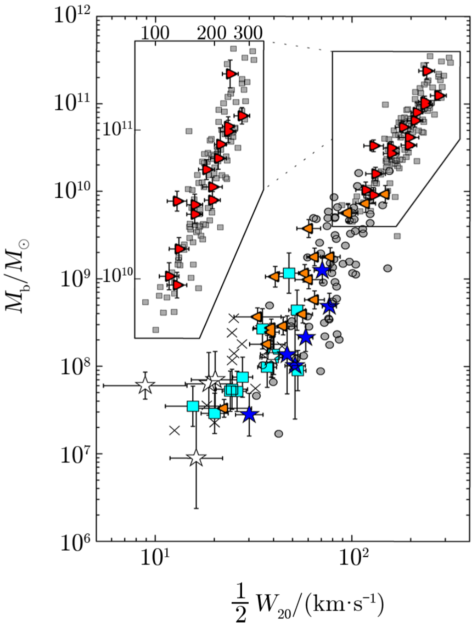
(2) BTFR 适用范围广

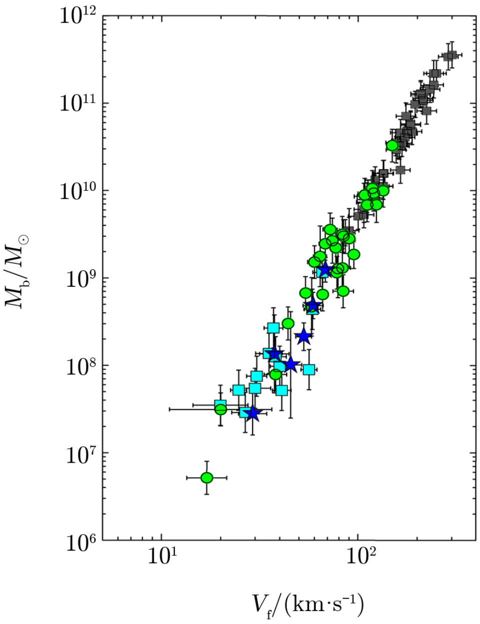
从 TFR 到 BTFR 的发展线来看，最开始 TFR 纵轴用光度 (L 或某个波段的星等)，之后用恒星质量，再到 BTFR 的重子物质质量，这个标度关系的适用范围也越来越广。最初的光度只适合于旋涡星系，不同类星系质光比 (星系中恒星质量与光度之比) 并不一样，这会导致同样光度的不同类星系有不同的 TFR 拟合线斜率和弥散，很不统一。恒星质量作 TFR 纵轴的时候，往往考虑多波段甚至几乎全波段 (如 CIGALE 软件包，SED 方法)，大质量旋涡星系总体能拟合出统一的 TFR 线，但是小质量端的 TFR 弥散比较大。而 BTFR 在小质量端和大质量端都符合得很好。研究还发现 BTFR 不仅适用于旋涡星系，还适用于部分不规则星系 (irregular galaxies)。Famaey 和 McGaugh[44]在 2012 年的文章中指出，对于旋涡星系所用的估计重子质量公式 (见 3.2 节) 完全适用于已知的不规则星系样本。这些例子都进一步证明了 BTFR 的普适性 (见图 2)。而且，从物理上，速度取决于总质量，因此 BTFR 的适用范围比 TFR 更广是合理的。

目前标准宇宙学模型 ΛCDM 并不能很好地解释 BTFR 的斜率，ΛCDM 预言的斜率是 3，然而观测上的斜率是 4。修改牛顿动力学 (Modified Newtonian Dynamics, MOND) 能很好地解释观测上 BTFR 的斜率。这种方法最初是为了代替暗物质，解释星系旋转曲线而提出，即不需要假设暗物质的存在，只要在大尺度修正经典牛顿引力。MOND 有一个特征加速度 $a_0 = 10^{-10}\ {\rm m{\cdot}s^{-2}}$：当加速度 a 远大于 a_0 时，$a \to g_N$；当 a 远小于 a_0 时，$a \to \sqrt{g_N a_0}$。该理论下，星系的动力学质量与气体旋转速度的四次方成正比，可以解释 BTFR 的结果。根据 Barnard 等人[46]的统计，近 10 年的 BTFR 的观测给出的斜率在 3~4 之间，因此目前没有成功的理论可以解释 BTFR 或 TFR，这两个经验关系来源于很多复杂的物理过程，限制了我们的星系形成模型，也给 MOND 理论带来了挑战。

2.3 数值模拟进展

TFR 与 BTFR，是把星系的恒星质量或重子物质质量与其气体旋转速度联系起来，而 ΛCDM 宇宙模型下，气体旋转速度 (假设可在水平段测量) 与星系暗物质晕相联系[45]。TFR 或 BTFR 是 ΛCDM 下“光”与“暗”的“桥梁”，也是检验所有星系尺度数值模拟的标尺，因此能正确得出 TFR (BTFR) 的模拟才有可能是正确的模拟。





注：两图中纵轴都是重子物质质量 (以 $M_\odot$ 为单位)，a) 和 b) 的横轴分别是 20% 峰值流量处线宽的一半和气体旋转曲线的水平段速度 (有高空间分辨率的旋转曲线)。McGaugh 等人[15]的数据标记为灰色，气体主导星系和恒星主导星系分别用圆形和方形表示；新数据的标记不同形状颜色表示不同批次或类别[45]，例如 Trachternach 等人[47]的样本都是五角星形状标记，蓝色和白色分别表示旋转曲线测到和未测到；Begum 等人[48]星系光学和气体盘倾角一致和不一致的样本分别用浅蓝色方形和叉号表示。a) 是大质量端样本抽取放大所作的图。b) 图绿色圆形标记为 Stark 等人[49]的气体主导星系，深灰色方形为 McGaugh[50]的恒星主导星系；另外，浅蓝色方形和蓝色五角星的含义与 a) 中相同。

图 2 McGaugh (2012) 的重子 Tully-Fisher 关系[51]

同时恢复星系的质量函数和 TFR 是一个巨大的挑战，直到 2009 年，几乎所有能恢复TFR的数值模拟都过多地预言了暗物质晕中的恒星比例[52]。近年来，数值模拟取得了巨大进步，许多著名的数值模拟都经过了 TFR 或 BTFR 和星系质量函数的检验，例如：TNG[53]用模拟中选出的 42 个蓝色星系样本作 BTFR 测试，其中重子物质质量统计的是 2 倍半恒星质量半径内的所有恒星和中性气体；Millennium-II[54]使用了模拟样本的 R 波段光度和最大旋转速度；NIHAO[4]则用“平均速度” $V_{50i} = \dfrac{W_{50}}{2\sin 60^\circ}$ 和恒星质量作 TFR 检验测试，且其模拟样本的恒星质量范围大 (10^5~$10^{12}M_\odot$)，样本点弥散较小。Glowacki 等人[55]在 2021 年用 SIMBA 模拟 (盒子尺寸 $(25h^{-1}\cdot\mathrm{Mpc})^3$) 所产生的红移为 0, 0.5, 1 处星系样本旋转曲线 (测水平速度) 和 HI 谱线 (测 W_{50} 和W_{20}) 测量旋转速度，并以此分别拟合三个红移处的 BTFR，发现了 BTFR 随红移有“微弱的变化”。不过，目前也有很多工作认为 BTFR 在低红移没有变化，例如 Ponomareva 等人[56]用 MIGHTEE-HI 光谱数据得出在过去 10 亿年 BTFR 未见演化的结论。

2.4 不同研究方式对BTFR的影响

2.4.1 单天线望远镜观测

GBT、Parkes、Arecibo、FAST 等射电望远镜是世界上主要的单天线望远镜。单天线观测有一定局限性，比如目标源附近有其他的源，得出的光谱数据有可能是多峰，形成误导，此时需要通过光学图像等辅助手段排除。当然，未受干扰的孤立源，HI 谱线的单双峰各有其原因。星系为旋转主导，但旋转曲线水平段半径处没有足够多的 HI 气体分布，即在星系外区没有足够多的粒子发出 HI 21cm 线以支持双峰的形成，则倾向于形成单峰；星系为速度弥散主导，也倾向于形成单峰；旋转曲线水平段半径处 HI 分布足够多，则倾向于形成双峰。此外，像 FAST 这种大口径单天线望远镜也有其优点，它灵敏度高，可以用于搜寻超弥散星系 (ultra diffuse galaxy, UDG) 候选体。若 UDG 候选体大量增加，对 UDG 偏离 BTFR 问题的解释将成为可能。

2.4.2 干涉阵望远镜测量速度场[57]

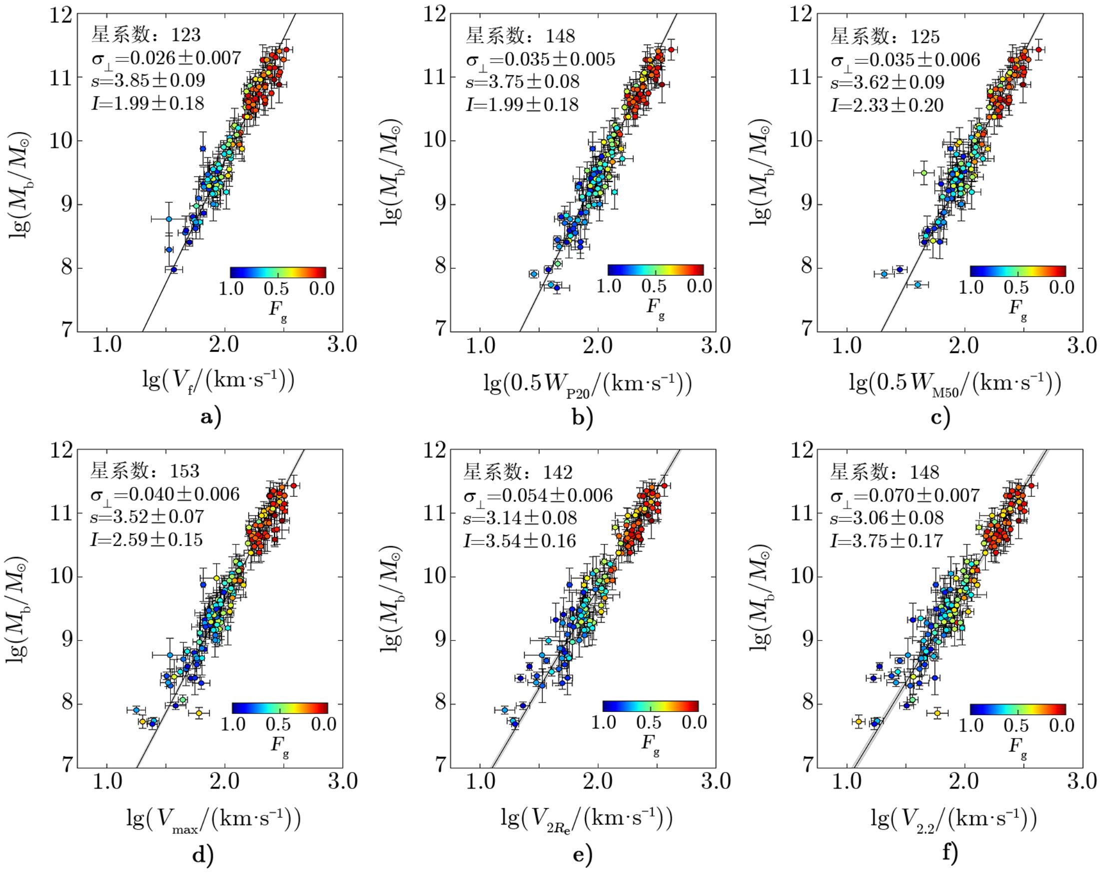
相比于上述单天线的局限性，干涉阵望远镜的最大优点是能获取星系运动特征的细节，因为不像单天线射电望远镜，干涉阵望远镜可以把望远镜放得很远，大大提高空间分辨率，但是会有流量丢失，需要很长的观测时间，大大降低观测效率。特别地，这里的速度场是三维的 (RA、DEC、等间距速度值的切片) 数据立方，这样就可以选取适当的方向 (某两对坐标位置 (RA1, DEC1)，(RA2, DEC2) 的连线) 斜截所有速度切片来得到速度有最大分布范围的切片 (称为位置-速度图或 P-V 图)，并网格化该切片，用高斯方法对网格化后的切片拟合得出旋转曲线，对于旋转曲线不完整的 (小的星系可能会出现射电信号被 UV 屏蔽的情况) 还可以依据 Hernquist 公式计算水平段速度。此外，由于有高空间分辨率的图像，能更好地避免其他源干扰目标源的问题，因为星系之间如果有物质流动或气体相互影响等，在切片上会有体现，判断较为简单，因此干涉阵除了可以为星系的 BTFR 研究提供更可靠的数据之外，还能研究星系际介质。关于 BTFR (以及 TFR) 的许多工作，都有各种不同的旋转速度定义，例如 $V_{\rm flat}, V_{\rm max}, W_{50}, W_{20}$ 等，每种定义都被广泛应用和讨论过，但其中能使 BTFR 弥散最小的是 $V_{\rm flat}$ (见图 3)[58]。

2.4.3 干涉阵的长基线

世界上最大的单天线望远镜 FAST，基线也只有 300 m，即对 21 cm 线的分辨能力约为 $3'$，对于许多星系而言，这个直径已经过大。要对几何尺度更小的星系进行观测，或开展高精度观测，必须依靠拉长基线的办法来提高空间分辨率，目前只有干涉阵望远镜能做到这一点。比如 VLA，由 27 面 25 m 口径的射电望远镜组成，Y 形分布，每个臂长为 21 km；GMRT 由 30 面 45 m 口径的射电望远镜组成，基线最长为 25 km。

2.4.4 倾斜环模型 (tilted-ring model)

随着射电望远镜，尤其是干涉阵，分辨能力的提高，HI 巡天把气体盘结构测得越来越清晰。盘星系的基本模型，是相对于地球上观测者以某个角度倾斜的椭圆盘，所以测量出的物质分布特征理应能用这种椭圆拟合，以便于近似地把盘星系运动特征参数化，并分析盘、晕结构运动特征以及星系物质分布等。倾斜环模型就是为此目的提出的，目前主流的软件



注：a) (V_f) 的样本点弥散最小。各图横轴定义中，V 为 HI 气体旋转速度，W 为 HI 谱线宽度；纵轴都是星系重子物质质量；颜色条表示气体比例 (颜色越蓝表示气体比例越高)。各图所标记的样本均取自 SPARC，样本数的差别取决于是否能得到这种定义方式速度的数据。各图的黑色线为图中样本的最小二乘法拟合结果（ 此图取自 Lelli 等人 (2019) 的图 2)。

图 3　Lelli 等人 (2019) 的重子 Tully-Fisher 关系拟合结果[58]

包包括 TiRiFiC (Tilted Ring Fitting Code，倾斜环拟合程序) 及由此发展出的 FAT (Fully Automated TiRiFiC)[59, 60] 和 3D-Barolo。

不过，单纯使用干涉阵望远镜也不完美，因为干涉阵拉长等效基线提高分辨率的同时，降低了灵敏度，最好的做法是在对同一目标源的研究中，把单天线与干涉阵结合起来，达成最好的观测效果。

3　大质量星系BTFR的气体含量依赖性

我们用 ALFALFA 100 (the completed Arecibo Legacy Fast ALFA (ALFALFA) survey, α100) 和 SDSS DR7 交叉数据集的星系，选择合适的样本，并进行分类，然后观测不同类

别星系样本点在 BTFR 上的特征，最终得出初步结论。

3.1 选源

美国的 Arecibo 射电望远镜是一台著名的单天线射电望远镜，直径为 300 m，21 cm 线角分辨率约 3.5′；α100 是这台望远镜的 21 cm 线巡天项目，共测量 31 502 个源的 HI 谱线。SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 是持续进行的大规模光学巡天项目，其数据产品给出了全天各个星系轴比、不同波段光度等信息 (对于有多波段的信息，本文采用 R 波段的，恒星质量除外——用全波段)。以 α100 和 SDSS DR7 交叉数据集作为总样本，共有 29 418 个源，覆盖天区面积约为 7 000 平方度。选源依照以下标准。

HI 光谱满足信噪比大于 10，或者信噪比 3∼10 但光谱边缘锋锐，且光谱为双峰。SDSS 测光数据方面，要求星系轴比小于 0.6，且删去角直径大于 6′ 的展源及正在并合的星系。我们把剩下的源分为两类：(1) 6′×6′ 光学图像中仅有目标源，没有其他源；或图像中有其他源，它们速度均已知，且均与目标源相差 1 000 km/s 以上，即孤立源。(2) 光学图像中，其他源速度已知，且与目标源速度相差 500 km/s 以内，角距离不超过 3′，即非孤立源。

总样本共 568 个。它们的 $M_{\rm HI}$ 直接取自 α100 星表，而 $M_{\rm stellar}$ 则使用 MPA 的恒星质量结果 (SED 方法)[61]—— 以 568 个样本的测光数据 (photoObjID) 与Sloan 的光谱数据 (specObjID) 匹配，以 MPA 的恒星总质量中值 (lgm-tot-p50) 作为恒星质量结果，成功匹配的样本共 348 个，舍去不能成功匹配的 220 个样本。

3.2 数据处理

本文以纵轴为重子物质总质量 $M_{\rm bar}$ (以 $M_\odot$ 为单位)，横轴为星系旋转速度 $V_{\rm HI}$，用双对数坐标作图。

(1) 关于重子物质总质量的获取。重子物质 ($M_{\rm bar}$) 包括恒星 ($M_{\rm stellar}$) 和气体 ($M_{\rm gas}$)，而宇宙中气体大部分是中性氢 (HI) 和中性氦 (HeI)，考虑宇宙中这两者数目之比与原子质量之比，可得：

$$M_{\rm bar} = M_{\rm stellar} + M_{\rm gas} = M_{\rm stellar} + M_{\rm HI} + M_{\rm HeI} = M_{\rm stellar} + 1.33M_{\rm HI}\ , \tag{9}$$

式中，$M_{\rm HI}$ 为 HI 气体质量，$M_{\rm stellar}$ 为恒星质量。

(2) 关于星系旋转速度的获取。首先对 α100 中 HI 光谱用 spectrum-pp 程序[62]测量 20% 峰值流量处的宽度，记为 $W_{20,\rm mea}$ (程序处理过程参考图 4)。由于 Arecibo 的频率分辨率，其测量 HI 谱线的速度分辨率为 10 km/s，因此有必要对上述结果作仪器致宽修正，修正后的 $W_{20} = \sqrt{W_{20,\rm mea}^2 - (\Delta s)^2}$，其中 $\Delta s = 10$ km/s。然后计算倾斜改正，即：

$$\sin i = \sqrt{\frac{1-(b/a)^2}{1-q_0^2}}\ , \tag{10}$$

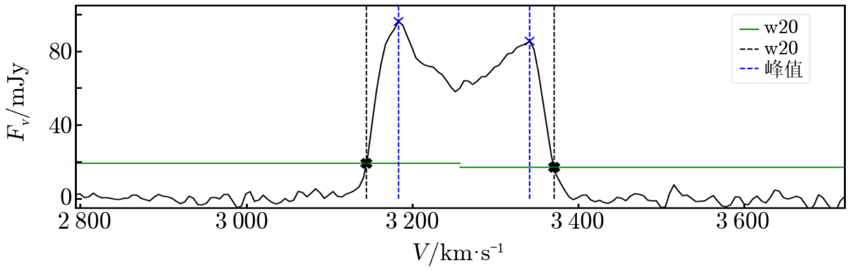
式中，b/a 称为轴比，数据取自 SDSS DR7。而星系盘的厚度 q_0 的获取采取一种新办法 (如图 5 所示)。由于 α100 星系总样本 (进行任何选源前的所有样本) 的轴比 (b/a) 与恒星质量 ($M_{\rm stellar}$) 分布的不均匀性，则可设 q_0 与 $M_{\rm stellar}$ 有关，因此对 $M_{\rm stellar}$ 按 0.5 dex 的宽度分

组，每个 $M_{\rm stellar}$ 分组中去掉轴比最小的 20 个样本点，并把剩下样本点的最小值标记 (图中的红点)，再用这些标记的红点做多项式最小二乘法拟合 (经过测试，三次多项式最适合)，得出 q_0 与 $M_{\rm stellar}$ 的关系：

$$q_0(M_{\rm stellar}) = 0.017M_{\rm stellar}^3 - 0.369M_{\rm stellar}^2 + 2.528M_{\rm stellar} - 5.852 \ . \tag{11}$$

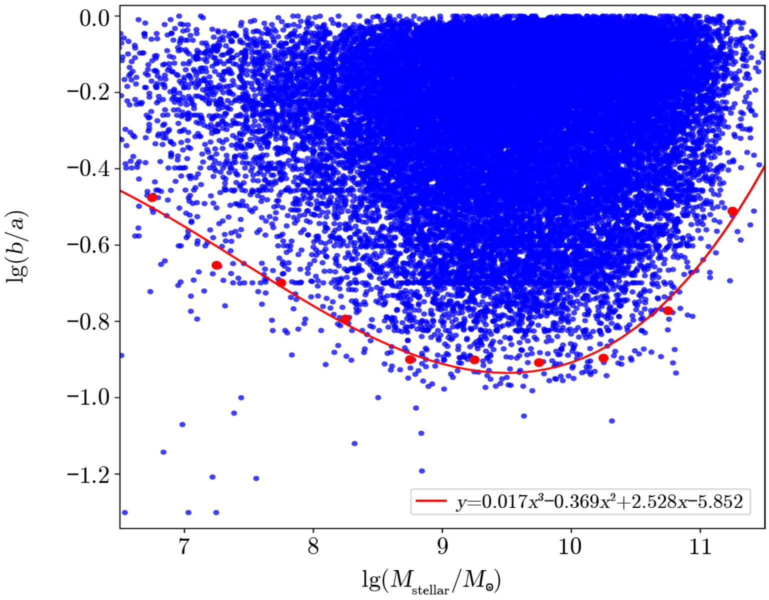
最后，计算旋转速度，即

$$V_{\rm HI} = \frac{W_{20}}{2\sin i} \ . \tag{12}$$



注：图中黑色实线为 HI 谱形，黑色虚线和蓝色虚线分别示意 20% 峰值流量和峰值流量处的速度值，绿色实线示意 20% 峰值流量，蓝色和黑色十字分别示意峰值点和 20% 峰值流量的点。spectrum-pp 程序先找到 HI 谱形的峰，然后向两侧外推分别找到 20% 峰值流量处速度值，这两个速度值之差就是测量的 W20 值 $W_{20,\rm mea}$。

图 4　UGC 1678 光谱数据处理结果

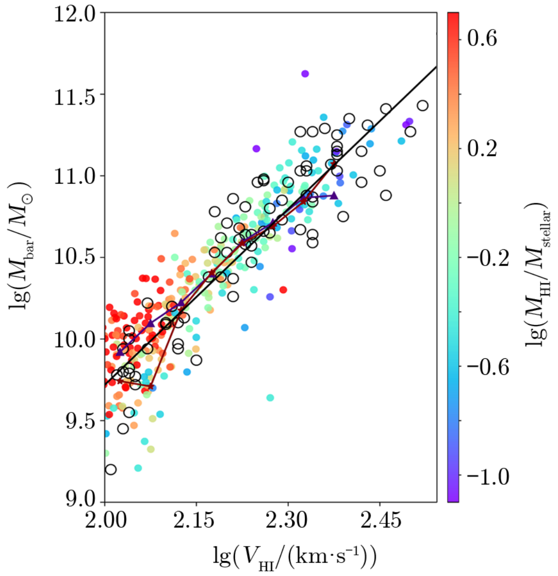


注：小的蓝色点是星系样本点。恒星质量分组为 [6.5, 7]，[7, 7.5]，…，[11, 11.5]，每组去掉轴比最小的 20 个样本后剩余样本轴比最小者以红色标记。以所有红点作最小二乘的三次多项式拟合，得到红色曲线。

图 5　α100 所有星系轴比-恒星质量分布

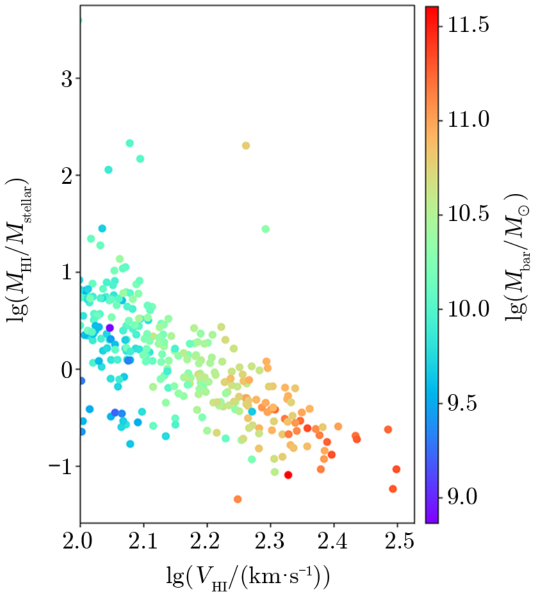
3.3 结果与结论

(1) 结果。如图 6 所示，孤立源样本点 (彩虹色圆点) 在 BTFR 平面上近线性分布，重子质量越小的星系气体比例相对较高。从图中折线可以看出，在小质量端，气体含量与重子质量有一定关联 (气体含量低的星系重子质量较小)；而在大质量端，气体含量与重子质量未见明显关系，且该段折线与已有的高精度测量样本集 SPARC (黑色空心圆点) 的 BTFR 拟合线符合较好；折线最右端的变化很可能是速度区间内样本数少造成的。图 7 展示了孤立源气体比例随 HI 旋转速度的分布，可以看出旋转速度越高的星系，其气体比例越低。图 8 显示了孤立源与非孤立源的 BTFR 的对比结果，可以看出 BTFR 没有明显的环境依赖性。此外，非孤立源和孤立源的BTFR 拟合线斜率 (观测的结果) 与 ΛCDM 下 BTFR 斜率的理论值 3 有相当大的偏差；这种偏差可能来源于星系经历的演化过程，例如超新星反馈机制。



注：颜色条表示 α100 中选出的大质量星系孤立源的 HI 气体与恒星质量比值，即气体比例。紫色折线，对横轴以 0.05 dex 作为区间大小分区，每区间气体比例最高 25% (数量) 星系样本的重子物质质量平均值就是紫色三角形，这些紫色三角形连成的紫色折线代表富气体星系在 BTFR 上的趋势。同理，褐色折线代表贫气体星系在 BTFR 上的趋势。SPARC 样本[17]用黑色空心圆表示，黑色直线是拟合线，斜率为 3.593。

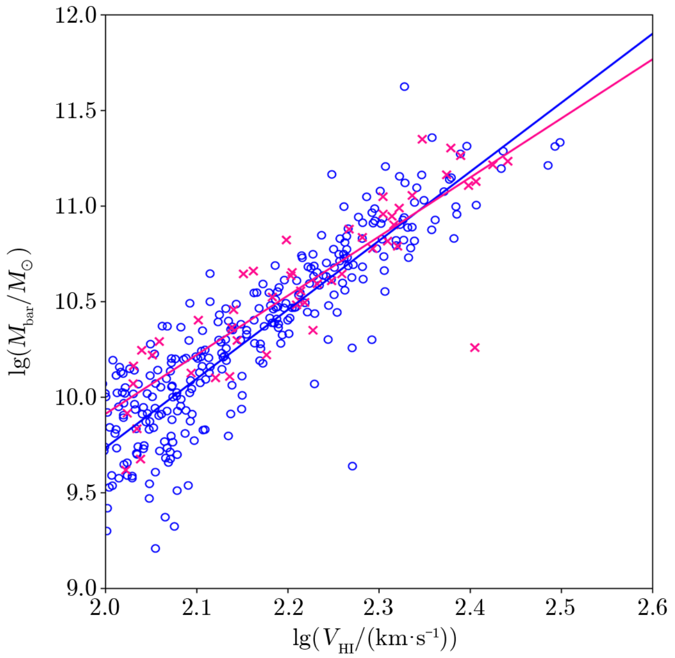
图 6 α100 中大质量星系的 BTFR



注：图中样本为 α100 中选出的大质量孤立源。图中彩虹颜色条表示重子质量。横轴表示 HI 旋转速度，纵轴表示气体质量占比。

图 7 大质量星系中性氢比例-中性氢旋转速度分布

(2) 结论。BTFR 在小质量端有一定的气体含量依赖性；而在大质量端，BTFR 受气体含量影响不明显。此外，在样本集的范围内，BTFR 没有明显的环境依赖性，表明大质量星系附近即使有干扰源 (非并合情形) 也不会对星系的 BTFR 造成较大影响。



注：横轴为 HI 旋转速度，纵轴为重子质量。蓝色空心圆表示孤立源，粉红色叉表示非孤立源。蓝色和粉红色直线分别表示孤立源、非孤立源的 BTFR 拟合线，斜率分别是 3.599、3.091。

图 8　大质量星系的环境依赖性

4　总结与展望

作为星系重要标度关系的 TFR 和 BTFR，是盘星系 (和一些不规则星系) 质量与气体旋转速度的幂函数关系。从 1977 年 TFR 被首次提出，只有十几个样本，到今天 TFR 和 BTFR 有了许多高精度的观测结果。近半个世纪以来，人们对 TFR 和 BTFR 的研究，从最初的单一波段测光到 20 世纪 80 年代开始的 CCD 多波段测光，再到后来以恒星质量或重子物质质量作为 Tully-Fisher 平面的纵轴。气体旋转速度的定义也有很多种，包括最大速度、水平段速度、20% 峰值流量处线宽等，其中使拟合结果弥散最小的是水平段速度。近十多年来，TFR 和 BTFR 还被广泛用于宇宙学数值模拟的检验，因为它们是对动力学特征的重要约束。我们也利用 ALFALFA 100 的光谱数据研究了大质量星系 BTFR 的气体含量依赖性，发现气体比例是可能的影响因素。

随着观测设备的分辨率提高和数值模拟精度的提高，当今人们在用 IllustrisTNG、EAGLE、SIMBA 等模型模拟 TFR 与 BTFR 演化的同时，已经开始向直接观测迈进，SKA 的建设就是一个例子。SKA 全称平方公里阵列 (square kilometer array)，是正在建设的世界最大射电天文观测设备之一，由澳洲、非洲多个台址组成低、中、高频阵列，最终目标是等效面积达到平方公里，频率范围为 50 MHz~20 GHz，观测到的中性氢红移甚至可以超过

1。而且“星系演化、宇宙学与暗能量研究”是其“五大科学目标”之一，具有超高分辨能力的 SKA 必将成为研究更高红移星系中性氢、恒星物质分布、运动状况，以及研究更高红移 TFR (BTFR) 的“利器”。实际上，作为 SKA“探路者”的 MeerKAT 望远镜 (由 64 台 13.5 m 口径天线组成的干涉阵，在南非) 从 2010 年开始[63]就开展超深场中性氢巡天 (The MeerKAT UltraDeep HI Survey)，目前已经完成了一些初步的 BTFR 演化研究工作。当红移从 0 到 1 甚至更远的高精度星系样本能通过 MeerKAT、SKA 等望远镜大量获得之后，TFR 和 BTFR 的演化研究将必然更加深入。

参考文献：

[1] Gurovich S, Freeman K, Jerjen H, et al. AJ, 2010, 140(3): 663

[2] Aaronson M, Huchra J, Mould J. ApJ, 1979, 229: 1

[3] Tully R B, Fisher J R. A&A, 1977, 54: 661

[4] Mould J, Aaronson M, Huchra J. ApJ, 1980, 238: 458

[5] Aaronson M, Mould J. ApJ, 1983, 265: 1

[6] Sandage A, Tammann G A. Nature, 1984, 307(5949): 326

[7] Willick J A. Ph.D thesis. USA: University of California, 1991

[8] Courteau S. PASP, 1992, 104: 976

[9] Han M. Ph.D thesis. USA: California Institute of Technology, 1991

[10] Hendry M A, Rauzy S, Salucci P, et al. arXiv e-prints, 1995: astro–ph/9508138

[11] Haynes M P, Giovanelli R, Chamaraux P, et al. AJ, 1999, 117(5): 2039

[12] Dale D A, Giovanelli R, Haynes M P, et al. AJ, 1999, 118(4): 1489

[13] Courteau S, Andersen D R, Bershady M A, et al. ApJ, 2003, 594(1): 208

[14] Bedregal A G, Aragón-Salamanca A, Merrifield M R. MNRAS, 2006, 373(3): 1125

[15] McGaugh S S, Schombert J M, Bothun G D, et al. ApJ, 2000, 533(2): L99

[16] McGaugh S S. AJ, 2012, 143(2): 40

[17] Lelli F, McGaugh S S, Schombert J M. ApJ, 2016, 816(1): L14

[18] Verheijen M A W, Sancisi R. American Astronomical Society Meeting Abstracts. USA: American Astronomical Society, American Astronomical Society Meeting Abstracts, 1996, 189: 54

[19] McQuinn K B W, Adams E A K, Cannon J M, et al. arXiv e-prints, 2022: arXiv:2203.10105

[20] Noordermeer E, van der Hulst J M, Sancisi R, et al. MNRAS, 2007, 376(4): 1513

[21] Desmond H. arXiv e-prints, 2012: arXiv:1204.1497

[22] Lelli F, McGaugh S S, Schombert J M, et al. MNRAS, 2019, 484(3): 3267

[23] Mancera Piña P E, Fraternali F, Adams E A K, et al. ApJ, 2019, 883(2): L33

[24] Topal S, Bureau M, Tiley A L, et al. MNRAS, 2018, 479(3): 3319

[25] Übler H, Förster Schreiber N M, Genzel R, et al. ApJ, 2017, 842(2): 121

[26] Tiley A L, Bureau M, Saintonge A, et al. MNRAS, 2016, 461(4): 3494

[27] Glowacki M, Elson E, Davé R. MNRAS, 2021, 507(3): 3267

[28] Strauss M A, Willick J A. Phys Rep, 1995, 261: 271

[29] Salim S, Lee J C, Janowiecki S, et al. ApJS, 2016, 227(1): 2

[30] Ponomareva A A, Verheijen M A W, Papastergis E, et al. MNRAS, 2018, 474(4): 4366

[31] Boquien M, Burgarella D, Roehlly Y, et al. A&A, 2019, 622: A103

[32] Yang G, Boquien M, Buat V, et al. MNRAS, 2020, 491(1): 740

[33] Kauffmann G, Heckman T M, White S D M, et al. MNRAS, 2003, 341(1): 33

[34] Gallazzi A, Charlot S, Brinchmann J, et al. MNRAS, 2005, 362(1): 41
[35] Bothun G D, Mould J R. ApJ, 1987, 313: 629
[36] Pierce M J, Tully R B. ApJ, 1988, 330: 579
[37] Bernstein G M, Guhathakurta P, Raychaudhury S, et al. AJ, 1994, 107: 1962
[38] Mathewson D S, Ford V L. ApJ, 1994, 434: L39
[39] Willick J A, Courteau S, Faber S M, et al. ApJ, 1995, 446: 12
[40] Willick J A. arXiv e-prints, 1996: astro–ph/9610200
[41] Tully R B, Pierce M J. ApJ, 2000, 533(2): 744
[42] Pizagno J, Prada F, Weinberg D H, et al. The Astronomical Journal, 2007, 134(3): 945.
[43] Makarov D I, Zaitseva N A, Bizyaev D V. MNRAS, 2018, 479(3): 3373
[44] Famaey B, McGaugh S S. Living Reviews in Relativity, 2012, 15(1): 10
[45] Lelli F, McGaugh S S, Schombert J M. ApJ, 2016, 816(1): L14
[46] Barnard M, Venter C, Harding A K. ApJ, 2016, 832(2): 107
[47] Trachternach C, de Blok W J G, McGaugh S S, et al. A&A, 2009, 505(2): 577
[48] Begum A, Chengalur J N, Karachentsev I D, et al. MNRAS, 2008, 386(3): 1667
[49] Stark D V, McGaugh S S, Swaters R A. AJ, 2009, 138(2): 392
[50] McGaugh S S. ApJ, 2005, 632(2): 859
[51] McGaugh S S. AJ, 2012, 143(2): 40
[52] Guo Q, White S, Li C, et al. MNRAS, 2010, 404(3): 1111
[53] Vogelsberger M, Genel S, Springel V, et al. MNRAS, 2014, 444(2): 1518
[54] Guo Q, White S, Boylan-Kolchin M, et al. MNRAS, 2011, 413(1): 101
[55] Glowacki M, Elson E, Davé R. MNRAS, 2021, 507(3): 3267
[56] Ponomareva A A, Mulaudzi W, Maddox N, et al. MNRAS, 2021, 508(1): 1195
[57] McQuinn K B W, Adams E A K, Cannon J M, et al. arXiv e-prints, 2022: arXiv:2203.10105
[58] Lelli F, McGaugh S S, Schombert J M, et al. MNRAS, 2019, 484(3): 3267
[59] Józsa G I G, Kenn F, Klein U, et al. A&A, 2007, 468(2): 731
[60] Kamphuis P, Józsa G I G, Oh S H, et al. MNRAS, 2015, 452(3): 3139
[61] Durbala A, Finn R A, Crone Odekon M, et al. AJ, 2020, 160(6): 271
[62] Guo Q, Hu H, Zheng Z, et al. Nature Astronomy, 2020, 4: 246
[63] Holwerda B, Blyth S, van Leeuwen J. ISKAF2010 Science Meeting. Netherlands: Sissa Medialab srl Partita, 2010: 68

Advances in the Research of Tully-Fisher Relation and Baryonic Tully-Fisher Relation

GUO Ming-yu[1,2], HU Hui-jie[1,2], GU Qing[1,2], YANG Hang[1,2], GUO Qi[1,2]

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Be ijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This work reviews Tully-Fisher relation and baryonic Tully-Fisher relation(TFR and BTFR), which are important scaling relations connecting galaxy luminosity and baryonic mass with its rotation velocity. TFR and BTFR both serve as the standard rules in comic distance measurements and thus are crucial in determining cosmological parameters. The

TFR make use of photometries in several bands. Despite the scaling relation existing in different wavelength, the slope and scatter varies. This can be explained by the different formation histories of different main tracers, e.g. the mass-to-light ratio is lower at shorter wavelength which is contributed mainly by young stars. Among all bands, the I and R bands present the smallest scatter. In order to further reduce the scatter of TFR, the luminosity is later replaced with stellar mass. Compared to TFR, BTFR includes gas components. It has many advantages. For example, the scatter, especially the intrinsic scatter, of BTFR is even smaller than that of the (stellar mass)TFR. Such tight relation also holds at low-masses. Besides, BTFR is more compatible, as it applies not only to disky galaxies, but also for irregular galaxies. To obtain the rotation velocity of the galaxy gas component, two kinds of telescope are used, telescope arrays and single-dish telescopes. The telescope array is superior to the single-dish in providing high spatial resolution image and velocity field data. With the help of modern theories, such as the tilted-ring model, one could obtain the rotation curve. On the other hand, large single-dish telescopes like FAST have high sensitivities given their large area, which is very useful in detecting weak sources like ultra diffuse galaxies(UDGs). In this paper, we present our preliminary results on the dependence of BTFR of massive galaxies on their gas fraction. We combine ALFALFA survey data with SDSS data, finding evidence of the gas fraction dependence. While BTFR is nearly independent on gas fraction for massive galaxies, at low masses, a weak yet positive dependence on gas fraction presents itself. Further studies using upcoming large arrays like SKA could be able to provide more reliable data for the kinematical studies.

Key words: Tully-Fisher relation; spiral galaxies; atomic hydrogen(HI)